



déterministe peine à reproduire certaines de nos observations. En effet, au fil de nos études de la phyllotaxie spiralee chez *Arabidopsis thaliana*, nous avons accumulé des mesures qui montrent des variations dans le motif, des imperfections par rapport à la séquence attendue. Notamment, l'angle de divergence s'écarte de l'angle d'or lorsqu'on le mesure le long des tiges. Toutefois, ces variations ne sont pas du bruit aléatoire : elles ont une structure stéréotypée très frappante. Leur étude statistique et mathématique, couplée à l'observation de la formation des organes en temps réel, nous indique qu'elles correspondent à des organes se formant en même temps et dont l'ordre se trouve de temps en temps permuté le long de la tige.

Ces permutations sont relativement courantes chez *Arabidopsis thaliana* et on les observe facilement dans la nature sur des plantes ayant, comme l'arabette, une tige allongée qui sépare les éléments botaniques. Or, bien que possibles dans le cadre du modèle déterministe, les permutations obtenues n'atteignent jamais ni l'intensité ni la complexité que l'on a mesurées.

LA PART DU HASARD

Ces variations dessinent en filigrane les mécanismes à l'œuvre. Comment donc modifier les mécanismes du modèle déterministe pour corriger ses écarts à la réalité ? Dans ce modèle, le niveau local du champ inhibiteur détermine si un organe va se former. À chaque pas de temps et pour toute position sur le pourtour du disque central d'un méristème, l'ordinateur calcule si les champs des organes voisins inhibent la croissance d'un organe, selon qu'ils dépassent ou non un certain seuil. Il génère alors un organe dans chaque zone où ce seuil est dépassé. Pourtant, de plus en plus d'études indiquent que le déclenchement de la formation d'un organe n'est pas aussi déterministe. Nous avons donc élaboré un nouveau modèle qui reprend les aspects géométriques du précédent, mais dans lequel ce déclenchement est probabiliste.

Un organe est produit selon une probabilité qui dépend du niveau d'inhibition (intensité et temps d'exposition) que les cellules perçoivent localement. L'introduction de cette nouvelle hypothèse dans le modèle permet de reproduire de manière plus fidèle les permutations mesurées chez *Arabidopsis thaliana*. De plus, nous en avons dérivé de nouveaux paramètres de contrôle du système, reliés à des propriétés observables comme la géométrie de la phyllotaxie, le nombre de permutations ou l'intervalle de temps qui sépare la formation des organes.

Ce nouveau modèle stochastique nous a aussi permis de remonter à des propriétés encore non observables, comme la sensibilité des cellules aux champs inhibiteurs. En

particulier, il suggère que la perception des signaux par les cellules est un facteur important à prendre en compte pour expliquer les motifs de phyllotaxie. Surtout, comme tout modèle, il offre un cadre pour proposer de nouvelles expériences et tester sa validité.

LES DÉFIS DES BIOLOGISTES

Tester un modèle n'est cependant pas une chose aisée, encore faut-il disposer des outils adéquats pour réaliser les expériences suggérées. Un premier défi consiste aujourd'hui à mesurer de façon précise et rapide plusieurs paramètres macroscopiques de l'architecture des plantes. Que ce soit pour étayer statistiquement les résultats ou pour distinguer les effets de différents gènes, la génétique nécessite souvent de mesurer de nombreuses plantes. Pourtant, l'étude de grosses cohortes n'est pas encore envisageable pour mesurer des paramètres comme l'angle de divergence, le nombre de permutations, la taille des tiges, le temps qui sépare la formation de deux organes, etc. Des procédures d'automatisation de ces mesures sont en développement, mais elles sont indispensables pour réaliser ce saut du qualitatif au quantitatif dans l'étude de la phyllotaxie.

Le deuxième défi est de relier quantitativement les paramètres de contrôle parfois assez abstraits définis dans les modèles à des données moléculaires ou cellulaires mesurables expérimentalement. Quelle est la taille d'un champ inhibiteur ? Quelle est celle de la zone centrale où aucun organe ne peut se former ? La difficulté provient cette fois du fait que ces paramètres ne sont pas nécessairement morphologiques, donc accessibles par la simple observation, mais fonctionnels. Il est donc nécessaire de connaître un minimum d'informations sur les bases moléculaires de ces fonctions pour en suivre la trace.

Par exemple, si les champs inhibiteurs correspondent aux concentrations d'auxine dans le méristème, il suffirait de suivre celles-ci au cours du temps pour déduire la dynamique des champs. Or jusque très récemment, il n'existait pas de moyen de mesurer quantitativement les niveaux d'hormones dans le méristème avec une sensibilité suffisante, à la résolution cellulaire. Mais en 2012, notre équipe a levé cet obstacle en élaborant un nouveau biocapteur (une protéine fluorescente sensible à la concentration d'auxine, voir la figure page 33) qui indique les concentrations d'auxine que les cellules perçoivent. En couplant ce biocapteur d'auxine avec d'autres marqueurs de l'activité et de la différenciation des cellules, il devient possible de suivre la dynamique spatiotemporelle de la distribution des signaux et de l'autoorganisation du méristème. Face aux modèles informatiques, la biologie moléculaire n'a donc pas dit son dernier mot ! ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. Refahi et al., **A stochastic multicellular model identifies biological watermarks from disorders in self-organized patterns of phyllotaxis**, *eLife*, vol. 5, article e14093, 2016.

C. Golé et al., **Fibonacci or quasi-symmetric phyllotaxis. Part I : Why ?**, *Acta Soc. Bot. Pol.*, vol. 85(4), article 3533, 2016.

F. Besnard et al., **Cytokinin signalling inhibitory fields provide robustness to phyllotaxis**, *Nature*, vol. 505, pp. 417-421, 2014.

G. Brunoud et al., **A novel sensor to map auxin response and distribution at high spatio-temporal resolution**, *Nature*, vol. 482, pp. 103-106, 2012.

T. Vernoux et al., **The auxin signalling network translates dynamic input into robust patterning at the shoot apex**, *Mol. Syst. Biol.*, vol. 7, article 508, 2011.

L'ESSENTIEL

> Au début du xv^e siècle, les colonies vikings du Groenland se sont mystérieusement vidées de leurs habitants.

> Les chercheurs ont longtemps expliqué leur déclin par le refus obstiné des Vikings d'adapter leurs coutumes européennes aux conditions de cette terre arctique.

> Pourtant, des fouilles archéologiques montrent que les Vikings du Groenland ont bien su évoluer.

> Un jeu complexe d'influences culturelles et politiques provenant de l'étranger aurait provoqué leur disparition.

L'AUTEUR



ZACH ZORICH
journaliste indépendant vivant au Colorado, aux États-Unis. Ancien archéologue, il contribue à diverses publications telles que le magazine *Archaeologia*, *Nature* et *Science*

L'énigme des Vikings du Groenland





Après avoir mené une vie prospère au Groenland pendant cinq siècles, les Vikings ont subitement quitté l'île au ^{xv}^e siècle.

Quelles sombres menaces ont effrayé ces Scandinaves, que l'on imagine intrépides et endurants ? De nouvelles découvertes archéologiques expliquent leur mystérieuse disparition.



An 1000, le long de la côte ouest du Groenland. Une embarcation à six rames emmène un équipage de Vikings vers le bout du monde ou du moins ce qu'on considère comme tel à l'époque. Le vent, la pluie et les embruns d'eau salée glaciale transforment le périple en cauchemar. Les risques de noyade et d'hypothermie guettent à chaque instant. Finalement, après quinze jours de navigation, le bateau accoste dans un golfe, aujourd'hui appelé baie de Disko. Des morces se languissent sur les plages, où ils sont venus se reposer et s'accoupler. Les animaux, une vraie aubaine, constituent des cibles faciles et leurs défenses d'ivoire valent certainement une fortune en Europe. Les Vikings se réjouissent. Leur voyage éreintant est grassement remboursé.

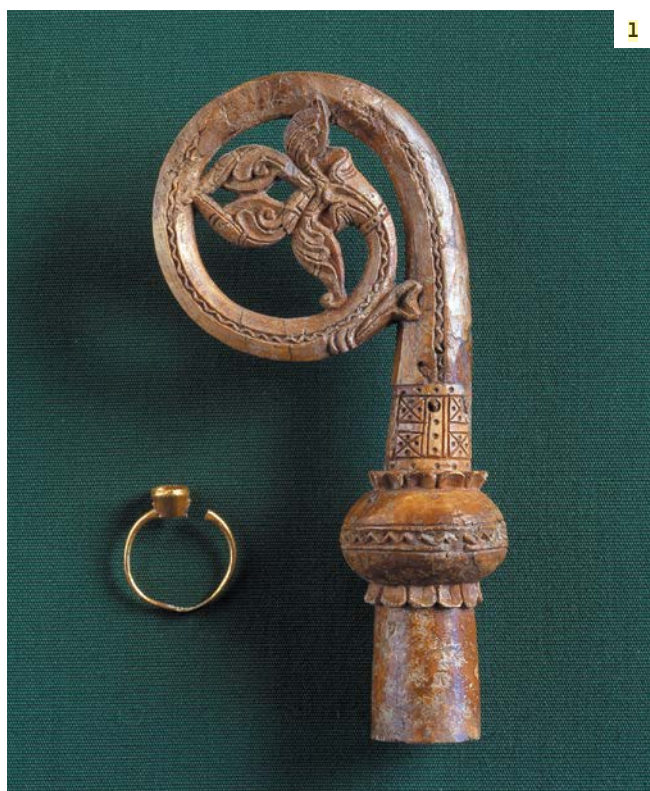
Pendant des centaines d'années, les Vikings, également connus sous le nom de

Northmen (« Hommes du Nord »), ont régné sur cet avant-poste arctique. Ils y ont établi deux colonies florissantes qui, à leur apogée, comprenaient des milliers de membres. Mais dans la première moitié du ^{xv}^e siècle, celles-ci ont disparu. Les Vikings s'étaient comme volatilisés. Que s'est-il donc passé ?

L'explication classique de la fin de l'implantation viking au Groenland tient en deux mots : la force de l'habitude. Les colons se seraient accrochés obstinément au mode de vie européen, s'entêtant à aménager des pâturages pour leurs vaches et leurs moutons sans s'aviser que ce type d'agriculture était mal adapté au climat froid et au terrain rocailleux de la région. Toutefois des preuves archéologiques, de plus en plus nombreuses, nous racontent une autre histoire, plus complexe.

D'abord, les Vikings auraient bel et bien su s'écarter de la tradition européenne pour s'adapter aux défis uniques que posait le Groenland. Ils ont appris, par exemple, à

Ces artefacts révèlent les facettes de la vie des Vikings au Groenland. Un anneau et le bâton de la tombe d'un évêque (1) témoignent de l'influence de l'Église sur les colonies. Les Vikings du Groenland entretenaient des liens culturels avec l'Europe, embrassant leurs modes vestimentaires (2) et leurs coutumes.



1



2